

**Anežka JURČÍKOVÁ<sup>1</sup>, Přemysl PAŘENICA<sup>2</sup>, Miroslav ROSMANIT<sup>3</sup>**

**NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ A LABORATORNÍ ZKOUŠKY  
ŠROUBOVANÝCH MONTÁŽNÍCH SPOJŮ S ČELNÍ DESKOU**

**NUMERICAL MODELLING AND LABORATORY TESTS  
OF END-PLATE ASSEMBLING BOLT CONNECTIONS**

**Abstrakt**

Předmětem této práce bylo vytvoření numerických modelů šroubovaných montážních spojů CHS (kruhové duté profily), resp. L profilů s čelní deskou a jejich následné porovnání s provedenými laboratorními experimenty. Porovnání výsledků ukázalo, že numerické modely vystihují základní chování styčníků. V numerických modelech byly zohledněny skutečné laboratorní podmínky zahrnutím tuhosti zkušebního lisu v prokluzu.

**Klíčová slova**

ANSYS, montážní spoj, numerické modelování, páčení šroubů.

**Abstract**

Subject of this work was to create numerical models of assembling bolt connections of CHS (circular hollow sections) or L-profiles respectively and their subsequent comparison with performed laboratory experiments. Comparison of results showed that numerical models describe the basic behavior of those joints. The actual conditions in the laboratory were taken into account in the results of numerical models, in the form of the test press slip stiffness.

**Keywords**

ANSYS, assembling connection, numerical modeling, prying of bolts.

## **1 ÚVOD**

Hlavními výhodami ocelových příhradových vazníků, či příhradových rámových konstrukcí z dutých i otevřených průřezů jsou především jejich příznivé statické působení, dostatečná tuhost při zachování subtilnosti konstrukce, ale také jejich estetický vzhled. Proto jsou tyto konstrukce stále často využívány v praxi pro výstavbu halových objektů a pro překlenutí velkých rozponů. U velkorozponových konstrukcí je však zapotřebí propojit jednotlivé dílce, k čemuž se často využívá montážních spojů s čelní deskou.

Takovéto spoje, v případě, že jsou namáhány tahem, je třeba posuzovat také s uvážením případného vlivu páčení. Postupy dle současné normy [1] jsou komplikované a u spojů některých typů průřezů nejsou ani přesně popsány. Problematika posuzování náhradního T-profilu v tahu a zkoumání vlivu páčení je i dnes aktuální a mnohá světová pracoviště se tímto zabývají [2, 3, 4].

---

<sup>1</sup> Ing. Anežka Jurčíková, Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 391, e-mail: anezka.jurcikova@vsb.cz

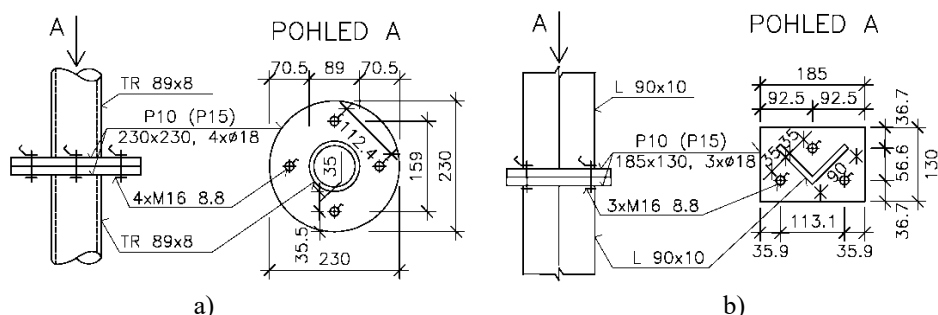
<sup>2</sup> Ing. Přemysl Pařenica, Katedra konstrukcí, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 391, e-mail: premysl.parenica@vsb.cz

<sup>3</sup> Ing. Miroslav Rosmanit, Ph.D., Katedra konstrukcí, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 398, e-mail: miroslav.rosmanit@vsb.cz

Tato práce je zaměřena na vytvoření numerických modelů šroubovaných montážních spojů CHS, resp. L profilů s čelní deskou, které mají vystihovat skutečné chování spoje, a následné porovnání výsledků těchto numerických modelů s výsledky provedených fyzikálních testů.

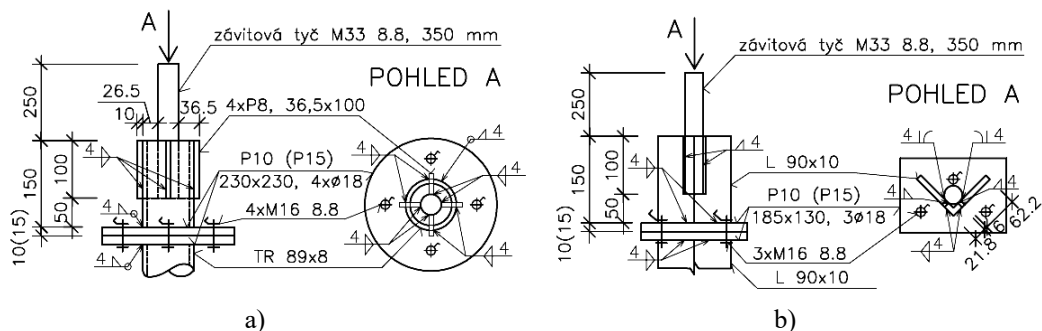
## 2 GEOMETRIE ŘEŠENÝCH SPOJŮ

Řešené montážní spoje spojují dva CHS profily TR 89x8 (obr. 1 a), resp. dva profily L 90x10 (obr. 1 b). Styčníky CHS profilů byly tvořeny dvěma kruhovými čelními deskami o průměru 230 mm, tloušťky 10 mm, resp. 15 mm. Styčníky L profilů tvořily obdélníkové čelní desky o rozměrech 185x130 mm, také tloušťky 10 mm, resp. 15 mm. Všechny styčníky byly navzájem spojeny šrouby M16, pevnostní třídy 8.8.



Obr. 1: Základní geometrie řešených styčníků – a) Spoj CHS profilů; b) Spoj L profilů

Schémat vyrobených zkušebních vzorků jsou znázorněny na obr. 2. Jako materiál pro výrobu čelních desek byla dodána ocel třídy S355 a pro CHS i L profily pak byla využita ocel S235. Šrouby M16 byly pevnostní třídy 8.8, tedy s uvažovanou mezí pevnosti  $f_{ub} = 800$  MPa. Pro ověření materiálových charakteristik plechů čelních desek a L profilu byly v laboratoři FAST provedeny trhací zkoušky materiálových vzorků a výsledky byly zahrnuty do numerické analýzy styčníků.

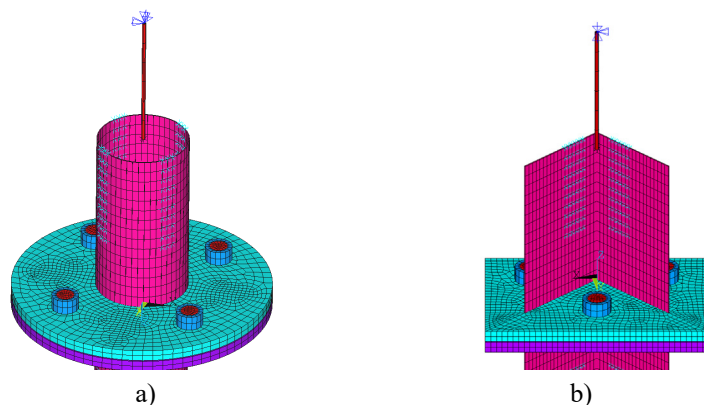


Obr. 2: Schémata zkušebních vzorků – a) Spoj CHS profilů; b) Spoj L profilů

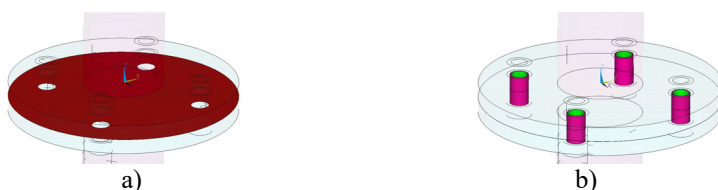
## 3 NUMERICKÉ MODELÝ

Všechny numerické modely styčníků (obr. 3) byly vytvořeny v MKP programu ANSYS 12.0 s využitím konečných prvků umožňující nelineární výpočty (plastické chování materiálu i vliv velkých deformací – Large Displacement Static). Pro modelování CHS i L profilů byl použit 4-uzlový skořepinový konečný prvek SHELL 43. Pro modelování ostatních prvků spoje (čelní desky, šrouby, matice, resp. hlavy šroubů) byl pak použit 8-uzlový 3D konečný prvek SOLID 45. Dále byly použity kontaktní prvky TARGE 170 a CONTA 174 pro vytvoření tzv. kontaktních párů mezi povrchy čelních desek a mezi povrchy šroubů a vnitřní plochou děr v čelních deskách – obr. 4 a), b). Zatížení bylo do spoje vnášeno, podobně jako u reálných vzorků, přes prutový prvek, který simuloval přivařenou závitovou tyč. Tento prutový prvek byl modelován s využitím 3-uzlového prostorového liniového prvku BEAM 189 se zadaným kruhovým průřezem o průměru 33 mm. Prutový prvek byl

se skořepinovými prvky (reprezentující CHS, resp. L profil) propojen přes řídicí uzel pomocí kontaktních prvků TARGE 170 (pro řídicí uzel v prostoru) a CONTA 175 (uzly na skořepinách) s využitím tzv. MPC (Multi-Point Constraints) algoritmu (více viz [4]). Okrajové podmínky pak byly zadávány na koncové uzly prutů a zatížení bylo vnášeno v podobě zadané osové deformace  $u_z$ .

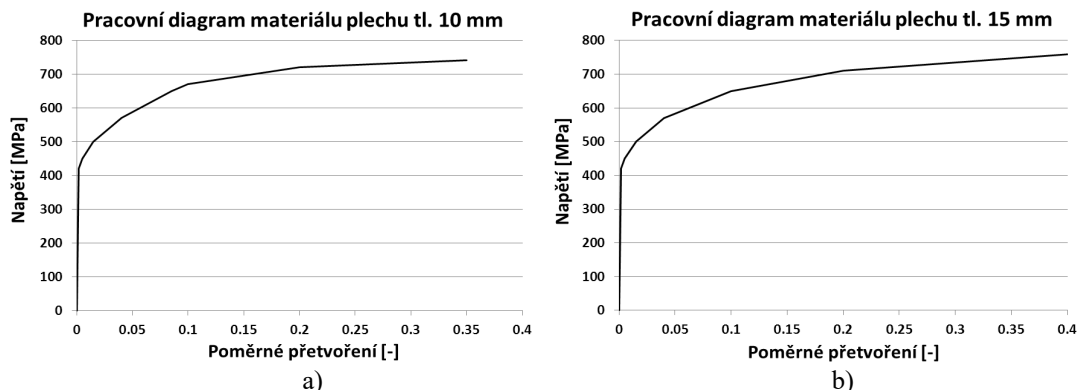


Obr. 3: Numerické modely styčnicků – a) Spoj CHS profilů; b) Spoj L profilů

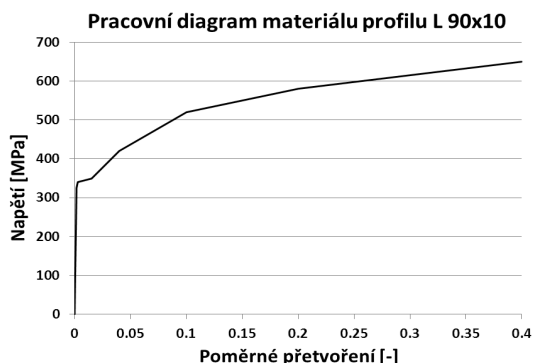
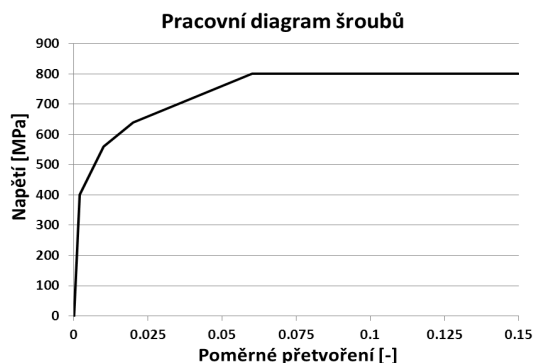


Obr. 4: Kontaktní plochy (u modelu s CHS profily) – a) mezi povrchy čelních desek; b) mezi povrchem šroubů a vnitřní plochou děr v čelních deskách

Konečným prvkům byly zadány následující materiálové vlastnosti (podobně jako [6], [7]): Youngův modul pružnosti  $E = 210 \text{ GPa}$  a Poissonův součinitel  $\nu = 0,3$ . Při výpočtu byla uvažována fyzikální nelinearita (plastický výpočet) i teorie velkých deformací. Pružno-plastické chování materiálů bylo vyjádřeno multilineárními pracovními diagramy dle obr. 5, které vycházely z provedených materiálových zkoušek. Jelikož tahové zkoušky šroubů provedeny nebyly, vycházelo se pro tento pracovní diagram z dostupné literatury a byl použit materiálový model dle práce Swansona [8]. Numerické modely byly v mnoha ohledech zjednodušeny, například napojení matice na šroub a následné spojení mezi maticí, resp. hlavou šroubu a čelní deskou bylo namodelováno jako tuhé, což přesně neodpovídá skutečné situaci, ale pro vystižení chování spoje je toto zjednodušení dostačující.



Obr. 5: Použité pracovní diagramy materiálů – a) plech tloušťky 10 mm; b) plech tloušťky 15 mm

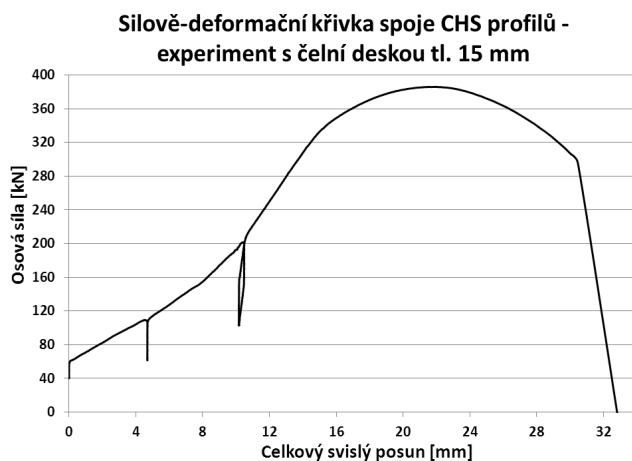


Obr. 5: Použité pracovní diagramy materiálů – c) šrouby;  
d) profil L 90x10 (stejný použit pro profil TR 89x8)

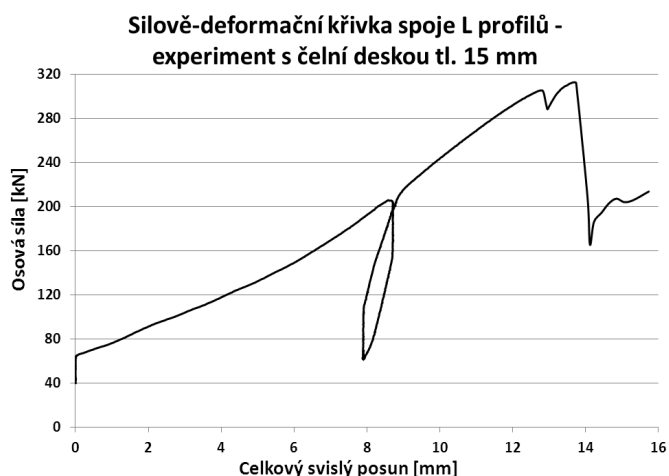
#### 4 VÝSLEDKY LABORATORNÍCH ZKOUŠEK STYČNÍKŮ A NUMERICKÉHO MODELOVÁNÍ A JEJICH VZÁJEMNÉ POROVNÁNÍ

Při laboratorních zkouškách byly z lisu zaznamenávány údaje o vnášené osové síle a o celkovém posunu ve svislém směru. Grafy se silově-deformačními křivkami jednotlivých styčníků získaných při fyzikálních testech jsou zobrazeny na obr. 6 až 9. Nejprve byly provedeny testy spojů s čelními deskami tloušťky 15 mm, kde nebyla předpokládána významná plastizace desek a o únosnosti spojů mělo rozhodovat porušení šroubů. U těchto vzorků bylo prováděno postupné zatěžování, díky čemuž je ze silově-deformačních křivek (obr. 6 a 7) patrná tuhost samotných styčníků. U spoje CHS profilů došlo neočekávaně k porušení závitové tyče vlivem excentricity, která byla zapříčiněna způsobem uchycení závitové tyče v čelistech lisu. Zavedení excentricity na daném testovacím zařízení nelze ovlivnit a bohužel už malá excentricita způsobila výraznou změnu namáhání v závitové tyči. Velikost této imperfekce je obtížně kvantifikovatelná, avšak na chování zkoumaných styčníků vliv nemá. Výsledky ze zkoušky styčnicku CHS profilů tedy neprokazují skutečnou únosnost vzorku. U spoje L profilů pak došlo dle předpokladů k porušení prostředního šroubu, a to stržením závitu.

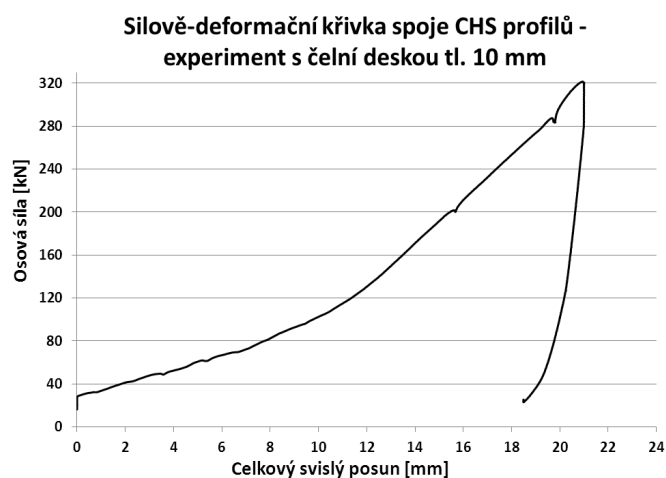
U spojů s čelními deskami tloušťky 10 mm byla očekávána výrazná deformace čelních desek vlivem plastizace. Při těchto testech již vzorky nebyly zatěžovány postupným přitěžováním, ani nebylo dosaženo plné únosnosti spojů (z důvodu bezpečnosti práce v laboratoři). Cílem zde bylo dosažení trvalých plastických deformací v čelních deskách, kterých bylo dosaženo, což mimo jiné potvrdilo např. překročení měřicí kapacity tenzometrů.



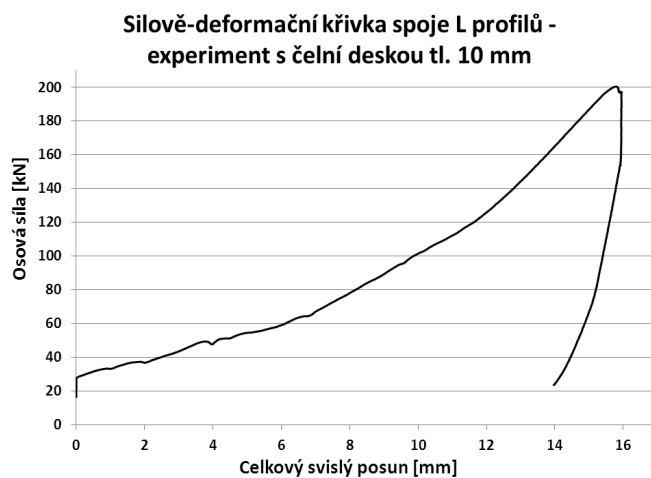
Obr. 6: Silově-deformační křivka ze zkušební lisu – Spoj CHS profilů s 15 mm čelní deskou



Obr. 7: Silově-deformační křivka ze zkušebního lisu – Spoj L profilů s 15 mm čelní deskou



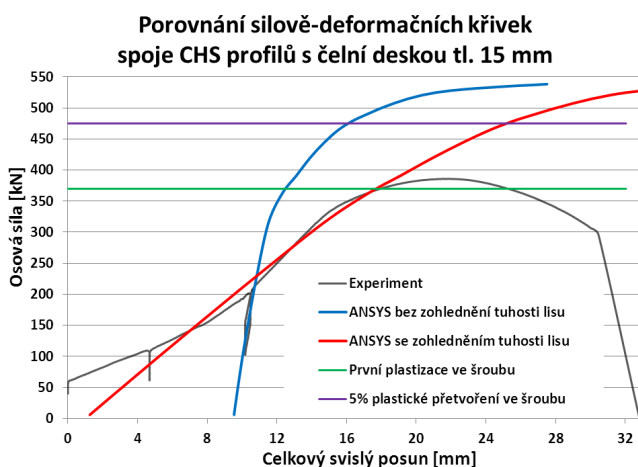
Obr. 8: Silově-deformační křivka ze zkušebního lisu – Spoj CHS profilů s 10 mm čelní deskou



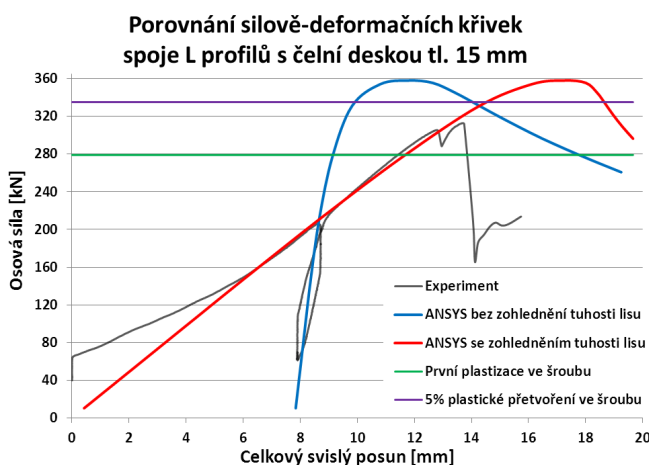
Obr. 9: Silově-deformační křivka ze zkušebního lisu – Spoj L profilů s 10 mm čelní deskou

Stejně jako při fyzikálních testech, také u numerických modelů byla sledována závislost výsledné osové síly ( $F_z$ ) na celkové osově deformaci spoje ( $u_z$ ). Výsledné silově-deformační křivky byly následně porovnávány s výsledky provedených experimentů (obr. 10 – 13). Jelikož však numerické modely vyjadřovaly čistě vlastnosti samotného styčnicku, zatímco při testech byly výsledky ovlivněny také vlastnostmi zkušebního lisu, bylo třeba tyto reálné podmínky zohlednit ve výsledcích numerického modelování. Laboratorní podmínky byly zohledněny zavedením tuhosti čelistí lisu v prokluzu a počátečním prokluzem (podobně jako [9]), což mělo vliv na hodnoty celkové osové deformace styčnicku, při zachování hodnoty výsledné osové síly.

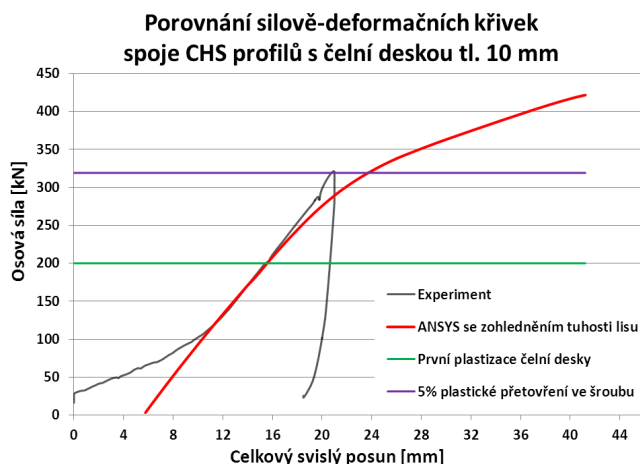
Hodnoty tuhosti lisu v prokluzu byly určeny na základě výsledků experimentů (dle sklonu experimentální silově-deformační křivky) a závisí mimo jiné na materiálových vlastnostech uchyceného prvku, na jeho rozměrech, či povrchu. Vzhledem ke stejnému způsobu uchycení vzorků ve zkušebním lisu, byla stanovena tuhost v prokluzu pro všechny experimenty stejná a její velikost byla 27 MN/m. Zavedení této tuhosti do výsledků numerického modelování ovlivnilo sklon získaných silově-deformačních křivek. Velikost počátečního prokluzu pak byla pro každý experiment určena individuálně. Výše popsaná změna sklonu je patrná z křivek na obr. 10 a 11 (křivky „ANSYS bez zohlednění tuhosti lisu“ a „ANSYS se zohledněním tuhosti lisu“).



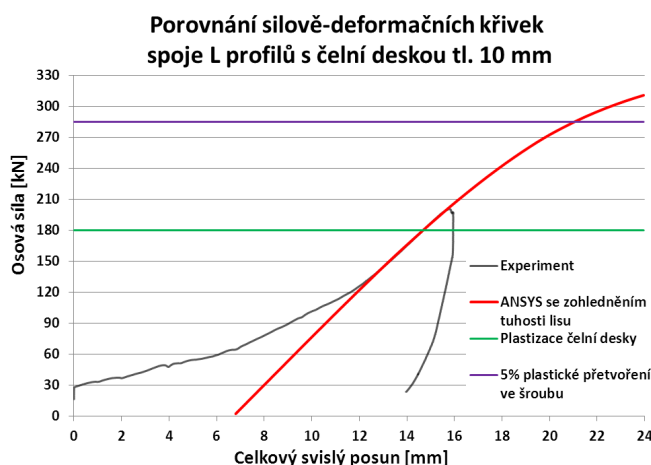
Obr. 10: Porovnání silově-deformačních křivek – Spoj CHS profilů s 15 mm čelní deskou



Obr. 11: Porovnání silově-deformačních křivek – Spoj L profilů s 15 mm čelní deskou



Obr. 12: Porovnání silově-deformačních křivek – Spoj CHS profilů s 10 mm čelní deskou



Obr. 13: Porovnání silově-deformačních křivek – Spoj L profilů s 10 mm čelní deskou

## 5 ZÁVĚR

V MKP programu ANSYS 12.0 byly vytvořeny numerické modely šroubovaných montážních spojů CHS a L profilů s čelní deskou, které byly testovány v laboratořích FAST. Porovnání experimentálních a numerických silově-deformačních křivek ukázalo, že numerické modely vystihují základní chování styčnicků. V grafech na obr. 10 a 11 byly s experimentální křivkou porovnány jak výsledky numerických modelů se zohledněnou tuhostí čelistí lisu v prokluzu, tak i výsledky neupravené, které vyjadřují tuhost samotných styčnicků. Tyto původní hodnoty byly porovnávány s částí experimentální křivky při odlehčení a opětovném zatížení, která ukazuje skutečnou tuhost samotného vzorku, bez vlivu tuhosti zkušebního lisu. Z porovnání je zřejmé, že tuhosti numerického modelu i reálného vzorku se shodují. U všech grafů jsou pak naznačeny úrovně zatížení, při kterých v numerických modelech nastává první plastizace (dojde k překročení meze kluzu materiálu) a úroveň zatížení, kdy je dosaženo 5% plastického přetvoření. Toto přetvoření určuje mezní stav numerického modelu, dle [10], Příloha C.

Numerické modely styčnicků, u kterých bylo rozhodující porušení šroubů bez páčení, vystihují dobře chování styčnicků. Modely styčnicků, u kterých docházelo k výraznému páčení šroubů, vykazují drobný nesoulad – reálný vzorek vykazuje vyšší tuhost po zplastizování čelní desky, než numerický

model spoje. Pro tyto typy spojů by bylo vhodné provést další experimenty s podrobnější studií vlivu páčení na celkovou tuhost styčnicku.

Pro další výzkum se předpokládá provedení dalších experimentů s větším počtem zkušebních vzorků. Cílem celého výzkumu je pak návrh případných úprav stávajících analytických vztahů, které jsou uvedeny v normě a nejsou dostatečně obecné.

## PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek byl realizován za finanční podpory projektu číslo SK-CZ-2013-0171.

## LITERATURA

- [1] ČSN EN 1993-1-8, Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-8: Navrhování styčnicků. Český normalizační institut, 2006. 126s.
- [2] Katula, L., Márai, P.: Study the prying effect on bolted base-plate connections. In *Periodica Polytechnica – Civil Engineering*, Volume 57(2), 2013, p. 157-172. ISSN 1587-3773.
- [3] Hantouche, E.G., Rassati, G.A., Kukreti, A.R., Swanson, J.A.: Built-up T-stub connections for moment resisting frames: Experimental and finite element investigation for prequalification. In *Engineering Structures*, Volume 43, 2012, p. 139-148. ISSN 0141-0296.
- [4] Šabatka, L., Wald F., Kabeláč J., Gödrich L., Navrátil J.: Component based finite element model of structural connections. In *Proceedings of the 12th International Conference on Steel, Space & Composite Structures*. 28 – 30 May 2014, Prague, Czech Republic. p. 337-344, ISBN 978-981-09-0077-9
- [5] Jurčíková, A., Rosmanit, M.: Propojení 3D detailu styčnicku s prutovým modelem konstrukce s využitím MPC algoritmu. *Modelování v mechanice 2013: [mezinárodní konference]*, Ostrava, květen 2013. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-2694-3.
- [6] Hantouche, E.G., Kukreti, A.R., Rassati, G.A.: Investigation of secondary prying in thick built-up T-stub connections using nonlinear finite element modeling. In *Engineering Structures*, Volume 36, 2012, p. 113-122. ISSN 0141-0296.
- [7] Jurčíková, A., Rosmanit, M.: FEM Model of Joint Consisting RHS and HEA Profiles. In: *STEEL STRUCTURES AND BRIDGES 2012: 23rd Czech and Slovak International Conference*. Podbanské, September 2012. Procedia Engineering, Volume 40, 2012, p. 6. ISSN 1877-7058.
- [8] Swanson, J. A., Kokan D. S., Leon R. T.: Advanced finite element modeling of bolted T-stub connection components. In *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 58, 2002, p. 1015–1031. ISSN 0143-974X
- [9] Flodr, J., Krejsa, M., Mikolášek, D., Brožovský, J., Pařenica, P.: Numerické modelování tenkostěnného profilu s vlivem redistribuce ohybových moment. *Modelování v mechanice 2015: [mezinárodní konference]*, Ostrava, květen 2015. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2015. ISBN 978-80-248-3756-7.
- [10] ČSN EN 1993-1-5, Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-5: Boulení stěn. Český normalizační institut, 2008.

## Oponentní posudek vypracoval:

Prof. Ing. Ivan Baláž, PhD., Katedra kovových a dřevěných konstrukcí, Stavebná fakulta, STU v Bratislave.

Prof. Ing. Stanislav Kmet', PhD., Katedra kovových a dřevěných konstrukcí, Stavebná fakulta, TU v Košiciach.